第 39 卷 第 5 期 应 用 力 学 学 报 Vol. 39 No. 5
2022 年 10 月 Chinese Journal of Applied Mechanics Oct. 2022

文章编号:1000-4939(2022)05-0989-08

大跨开合屋盖风压特性研究

孙芳锦[1,2],祝东涵[1],张尚祥[1],冯旭[3],张大明[4,5]

(1. 辽宁工程技术大学土木工程学院,123000 阜新;2. 桂林理工大学土木与建筑工程学院,541004 桂林;
3. 五冶集团上海有限公司,201900 上海;4. 桂林理工大学信息科学与工程学院,541006 桂林;
5. 广西嵌入式技术与智能系统重点实验室,541004 桂林)

摘 要:大跨度屋盖结构已经成为建筑结构的主要形式之一,开合屋盖结构是近年来刚兴起的一种结构形式,国内通过数值模拟对大跨度开合屋盖的研究还处在起步阶段。本研究建立了 4 种不同开合状态的屋盖模型,并分析了在不同开合状态、不同风向角、不同风速下屋盖表面的风压特性,并在屋盖完全开启的情况下对其进行分区进而计算分区体型系数,给出合理的分区建议值,为以后的实际工程提供有效的参考。研究表明:风向角对屋盖表面风压的分布影响较大,特别是 30°和 60°风向角对其风压系数分布的影响较为突出。屋盖顶部的开合状态对风压分布影响也较为明显,但对风压系数值影响不大。

关键词:大跨结构;开合屋盖;风压特性分布;数值模拟;体型系数
中图分类号:TU399 **文献标志码:**A **DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2022.05.022

Wind pressure characteristics of a large span retractable roof

SUN Fangjin[1,2],ZHU Donghan[1],ZHANG Shangxiang[1],FENG Xu[3],ZHANG Daming[4,5]

(1. College of Civil Engineering,Liaoning Technical University,123000 Fuxin,China;
2. College of Civil Engineering and Architecture,Guilin University of Technology,541004 Guilin,China;
3. MCC Group Shanghai Co.,LTD,201900 Shanghai,China;
4. College of Information Science and Engineering,Guilin University of Technology,541006 Guilin,China;
5. Guangxi Key Laboratory of Embedded Technology and Intelligence System,541004 Guilin,China)

Abstract: Large-span roof structure has become one of the main forms of building structure,and the retractable roof structure is a new structure form in recent years. The research on large span retractable roof by numerical simulation in China is still in its infancy stage. This paper establishes four roof models with different opening and closing states,analyzes the wind pressure characteristics of the roof surface under different opening and closing states,different wind angles,and different wind speeds,and conducts the analysis when the roof is fully opened. The partition then calculates the partition size coefficient and gives a reasonable suggested value for the partition,which provides an effective reference for future actual projects. The results show that the wind direction angle has a great influence on the distribution of wind pressure on

收稿日期:2021-06-21 **修回日期:**2022-05-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52178468);广西自然科学基金联合资助培育项目(No. 2019GXNSFAA245037);广西青年创新人才科研专项资助项目(桂科 AD19245012);广西建筑新能源与节能重点实验室自主课题资助项目(桂科能 19-J-21-14);广西岩土力学与工程重点实验室项目(桂科能 19-Y-21-2);桂林理工大学科研启动基金资助项目(No. GUTQGJJ2019042;GUTQDJJ2019041)
通信作者:张大明,副教授。E-mail:e_horse@163.com
引用格式:孙芳锦,祝东涵,张尚祥,等. 大跨开合屋盖风压特性研究[J]. 应用力学学报,2022,39(5):989-996.
SUN Fangjin,ZHU Donghan,ZHANG Shangxiang,et al. Wind pressure characteristics of a large span retractable roof[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(5):989-996.

the roof surface; especially the 30° and 60° wind direction angles have a prominent influence on the distribution of wind pressure coefficient. The opening and closing of the roof also significantly affects the wind pressure distribution, but has little influence on the wind pressure coefficient value.

Key words: large-span structure; retractable roof; wind pressure characteristic distribution; numerical simulation; shape coefficient

大跨度屋盖结构具有自重轻、柔性大、几何非线性强等特点,且对风荷载的作用十分敏感。随着建筑行业的不断发展,大跨度屋盖结构已经成为现代建筑领域的重要角色。开合屋盖结构是近年来刚兴起的一个热点结构形式,可以满足多种天气条件的要求。宽敞的无立柱阻挡的可用空间不但是大跨度开合结构的最大优点,而且还能使建筑物的美观性增加,因此大跨度开合屋盖近些年来在大型游泳馆、体育场等得到了非常普遍的应用。但由于其自身顶部的开合设计使得其抗风设计问题也尤为突出,开合屋盖相当于在其顶部设计了一个大的洞口,那就需要考虑到内外压的共同作用,并且开合屋盖受风灾破坏要比正常的大跨屋盖严重,所以对开合屋盖结构的风压特性研究是非常有意义的。国内目前对大跨度开合屋盖的风压特性研究还处在起步的阶段[1],文献[2]列举了开合屋盖结构的典型案例,总结了其结构特点和发展趋势。文献[3]建立了开合屋盖结构缩尺的物理模型,通过开展不同条件下的物理模型试验总结出屋盖结构在运行状态下的变形及振动特性。文献[4]研究了网球馆在屋盖不同开合状态下结构表面的风压分布特点,并求解出结构的风致响应和风振系数。文献[5]分析了开合屋盖在3种不同情况下的风荷载特性,并总结了风振系数以及波动系数随风向的变化规律。

本研究探讨了大跨开合屋盖在四分之一开、半开、四分之三开和全开 4 种开合状态下的平均风压系数分布特性。总结出开合状态、风向角以及风速对大跨开合屋盖表面风压特性的影响,并给出了大跨开合屋盖的表面分区体型系数建议值,为日后的实际工程设计提供有效参考。

1　风压理论研究

因开合屋盖结构质量轻、柔性大、阻尼小、自振频率较低,所以风荷载的作用和影响极为突出。开合屋盖大多为三维空间曲面,不仅形状复杂而且风吹过屋面顶部时会产生气流分离和再附着,因此其绕流和空气动力作用要比正常结构复杂得多。对大跨开合屋盖结构风压特性的研究对实际工程有着重要的意义。目前,很多研究都是采用风洞试验来研究大跨开合屋盖的风压特性,这种方法不仅成本高、周期长,而且有些试验条件很难满足。因此采用数值模拟来研究风压特性能很好地避开上述问题。大跨度开合屋盖结构的风压分布情况受很多因素影响,包括风向、风速、结构自身形状和特征等。因此分析处理通过数值模拟得到的模拟数据能够较准确地反映开合屋盖结构的风压分布特点。本研究主要围绕开合屋盖结构表面的风压系数进行研究,进而得出开合屋盖结构表面风压分布规律。屋盖表面风压特性因屋盖的开启而发生改变,活动屋盖开启会使屋盖的下表面产生负压,两个风压的作用方向相反,二者之间相互作用的力彼此抵消掉一部分风压的影响作用,最后得到的总体风压有可能是负压也可能是正压。处理模拟数据时,屋盖开启风压净压为屋盖上下表面平均风压,可按下式计算各测点的风压系数,即

$$\Delta C_{pi}(t)=\frac{p_i^{\mathrm{f}}(t)-p_i^{\mathrm{b}}(t)}{\frac{1}{2}\rho V_{\mathrm{H}}^2}\qquad(1)$$

式中:$\Delta C_{pi}(t)$ 为屋盖模型上某测点 i 的风压系数;$p_i^{\mathrm{f}}(t)$ 和 $p_i^{\mathrm{b}}(t)$ 分别为屋盖模型上下表面测点 i 的风压;ρ 为空气密度;V_{H} 为屋盖模型前方来流未扰动处参考高度的平均风速。

2　数值模拟正确性验证

为了验证本研究所采用数值模拟方法的正确性,选用 TTU(Texas Tech University building model)[6]标准双坡屋面低矮建筑模型为验证对象,尺寸为 W30 ft×L45 ft×H13 ft(9.1 m×13.7 m×4 m),屋面坡度为 3°,在实际 TTU 模型的横向中心轴线上布置 11 个典型测点,如图 1 所示。下文将 TTU 现场实测数据、不同湍流模型下的风洞试验数据和数值模拟数据进行对比,来验证模拟的正确性。

TTU 模型计算域尺寸取为 $B\times L\times H=210$ m×100 m×50 m。网格核心区域采用四面体网格,并且

对模型表面进行边界网格划分，考虑边界层网格 y^+ 值，经多次试划分网格后将靠近建筑物表面第一层边界层网格厚度确定为0.005 m，此时模型周围边界层网格 y^+ 值绝大部分都在建议取值范围内（对于湍流流动 $y^+>30$，图 2），特别是模型顶面 y^+ 值都集中在[20，80]范围内，而模型迎风面、模型背风面和模型侧面的 y^+ 值除少数离散点外都集中在[30，60]范围内，建筑物表面第一层边界层厚度取值合理；非核心区域采用规则六面体进行划分并且远离建筑物网格逐渐稀疏，针对90°风向角工况进行数值模拟，网格数都控制在 70 万左右。

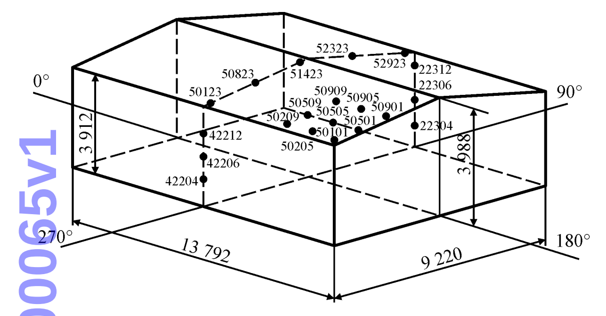


图 1　TTU 模型实际尺寸、风向角与测点位置（单位：mm）

Fig. 1　The actual size，the angle of attack and the position of the typical measurement points of the TTU model（unit：mm）



第一层边界层厚度取值和边界条件设置合理后，在 90°风向角下对 TTU 标准低矮建筑模型采用不同湍流模型（Standard k-ε 湍流模型、RNG k-ε 湍流模型、Realizable k-ε 湍流模型、SST k-ω 湍流模型）的测点风压进行数值模拟，并将其模拟数据与 TTU 标准低矮建筑现场实测数据和 TJ-2 风洞试验数据绘制成折线图进行对比，如图 3 所示。

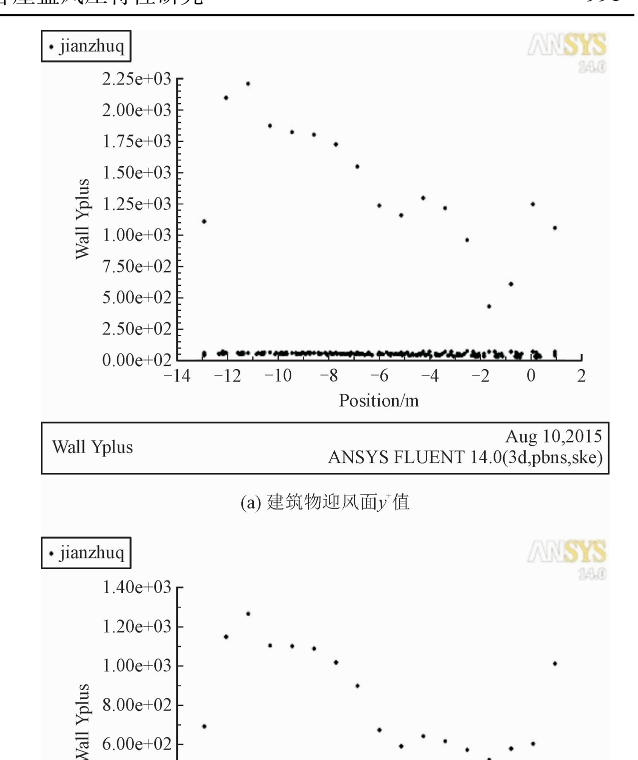
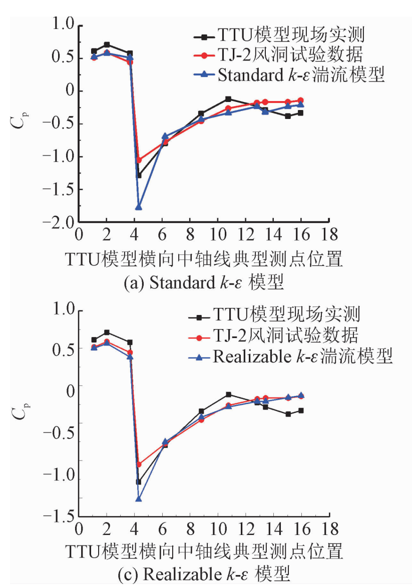


图 2　第一层边界层网格厚度为 0.005 m 时建筑物表面 y^+ 值分布

Fig. 2　The y^+ value distribution on the building surface by the first layer thickness of boundary layer mesh is 0.005 m



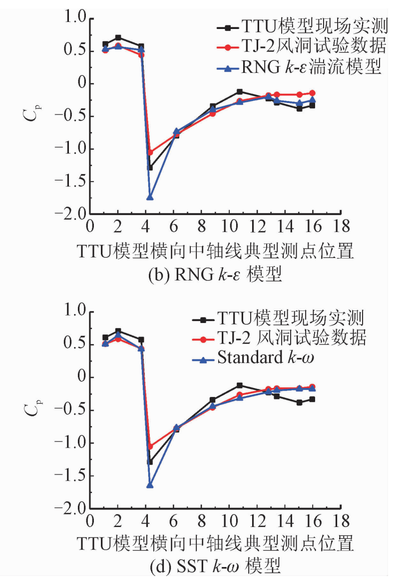


图 3　3 种数据在不同湍流模型下的对比图

Fig. 3　Comparison of three data sets under different turbulence models

由图 3 可知,3 条折线图吻合程度较高,由此证明了本研究数值模拟方法的正确性。

3 计算模型与条件设定

3.1 计算模型

本研究采用 1∶200 的缩尺在 ICEM[7] 中建立大跨开合屋盖的模型,根据开合情况共建立 4 个模型,分别为四分之一开模型、半开模型、四分之三开模型、全开模型,开合情况图示见图 4、图 5。

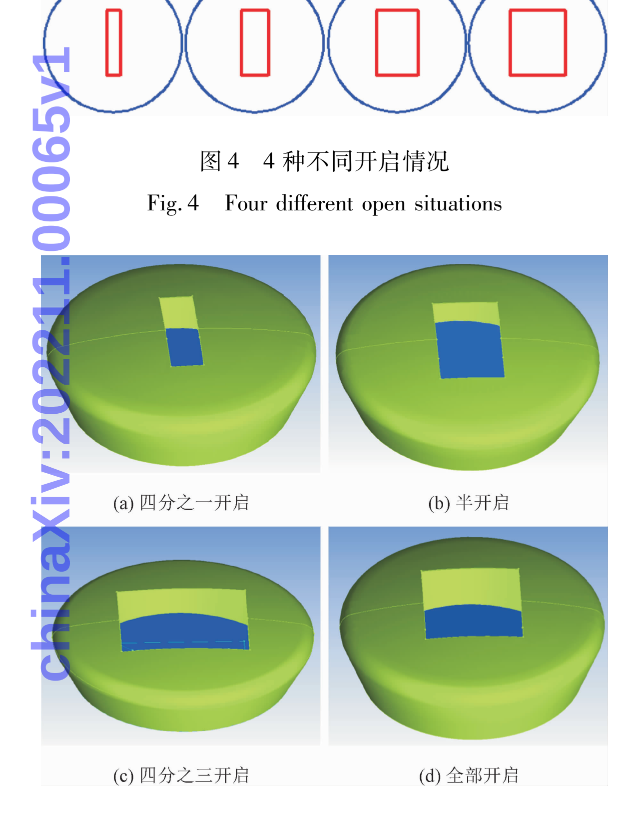


图 4 4 种不同开启情况

Fig. 4 Four different open situations

图 5 4 种开启情况下的模型

Fig. 5 Four open case models

以上 4 种模型的 $R1$、$R2$、H、L 均相等,$R1$ = 60 cm、$R2$ = 75 cm、H = 23 cm、L = 70 cm。

模型 a,D = 15 cm;模型 b,D = 30 cm;模型 c,D = 45 cm;模型 d,D = 60 cm。其中:$R1$ 为模型底部半径;$R2$ 为模型顶部半径;H 为模型高度;L 为顶部活动屋盖的开启长度 L 始终不变;D 为模型顶部活动屋盖的开启宽度,D 作为研究变量。本研究模型皆为开洞口模型,因此网格划分时要考虑到墙壁的厚度,故墙壁厚度设置为 2 mm。

3.2 数值模拟方案

本研究选用标准湍流模型,在 B 类地貌的情况下选取 4 种风速(分别为 7.5 m/s、10 m/s、15 m/s、20 m/s)和 4 种风向角(分别为 0、30°、60°、90°)对屋盖模型进行相关的数值模拟。

当风向角为 0°,风速为 10 m/s 时,按照文献[4]在全开屋盖模型上布置测点并进行数值模拟,通过对比模拟数据和相关风洞试验[4]得出的试验数据可以看出该模拟的准确性如图 6 和图 7 所示。

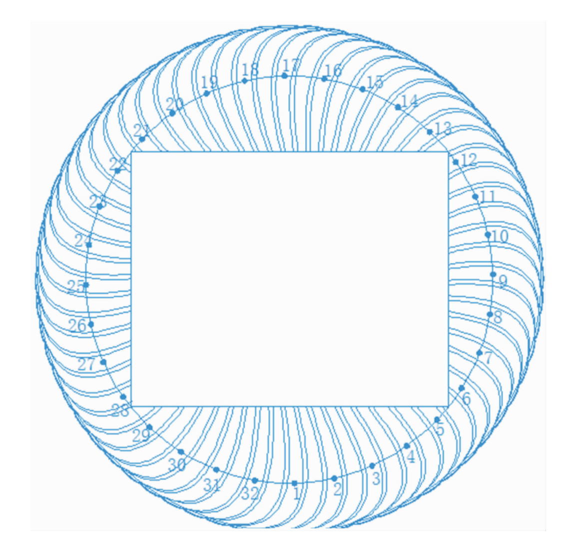


图 6 屋盖曲线示意图

Fig. 6 Roof curve diagram

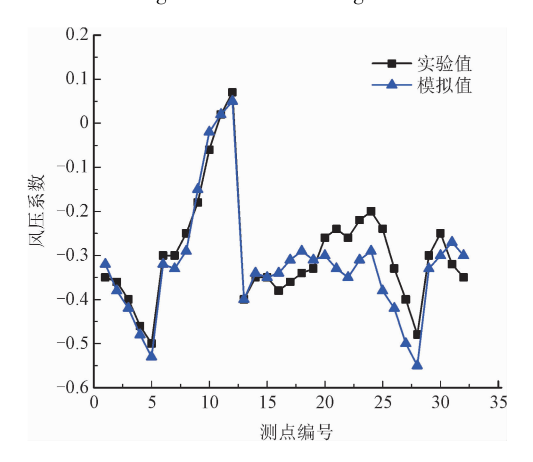


图 7 屋盖上下表面平均风压系数数据对比图

Fig. 7 Comparison of data of mean wind pressure coefficients on the upper and lower surfaces of roof

3.3 计算域的选取和网格划分

本研究经多次试算对比分析,取计算域为 $20L_2 \times 10L_1 \times 10H_{max}$,分别对应 X、Y 和 Z 轴。将模型置于距计算流域入口前沿 1/3 处。满足阻塞率小

于 3% 的要求。本研究主要采用六面体结构化网格，将建筑物附近进行了网格加密，最小网格尺寸为 0.005 m，设置网格增长因子使网格尺寸由建筑物向外逐渐增大，网格总数控制在 210 万左右，如图 9 所示。

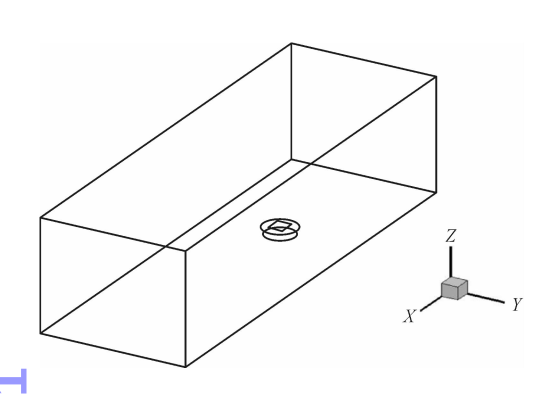


图 8　计算域模型图

Fig. 8　The model diagram of computational field

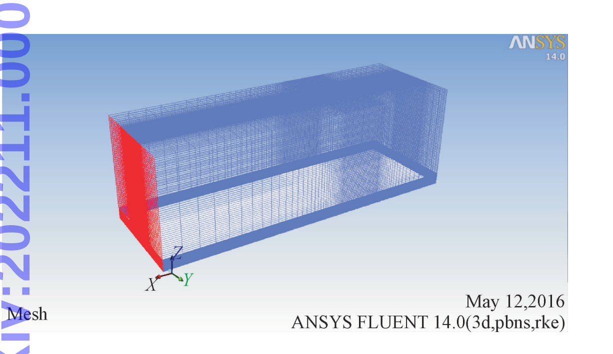


图 9　流场网格划分模型图

Fig. 9　The model diagram of flow field mesh

3.4　边界条件的设定

1) 入口边界条件

采用速度入口边界条件(velocity-inlet)，本研究采用指数律方法来计算风速，平均风速沿高度变化规律用指数函数表示的表达式为

$$\frac{\bar{u}(z)}{\bar{u}_b} = \left(\frac{z}{z_b}\right)^{\alpha} \tag{2}$$

式中：z_b是标准参考高度；$\bar{u}_b$ 是标准参考高度处的平均风速；z 是任一高度；$\bar{u}(z)$是 z 高度处的平均风速；α 是地面粗糙度指数，根据我国规范 α 取 0.15。

2) 出口边界条件

采用压力出口(pressure-outlet)。出口边界距离建筑物背风面的距离是 2/3 的计算域长度，可以保证流体达到完全发展。

3) 壁面

采用壁面条件的形式来限定计算域。建筑物表面和地面在 Fluent 中采用无滑移壁面(no slip wall)。

4　数值模拟分析

屋盖测点分布示意图见图 10。

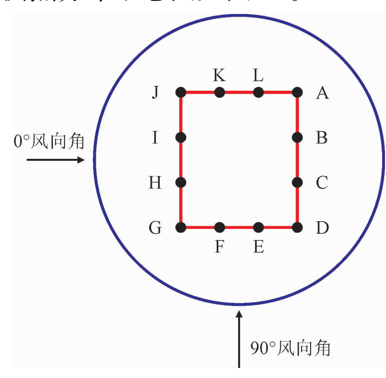


图 10　测点和风向角的分布示意图

Fig. 10　Distribution diagram of measuring point and wind direction angle

图 11 为 0°风向角时不同开合状态和不同风速条件下屋盖风压系数的折线示意图。

由图 11 可知：开合屋盖表面的风压系数随着风速的增加不断增大，当风速为 20 m/s 时风压系数达到最大值。风向角为 0°时，H 测点和 I 测点的风压系数最大，这是由于风向和 X 轴方向一致，I、H 测点在开合屋盖开洞口的迎风边界上，因此受到风的影响较其他测点大。屋盖开洞面积越大，各个测点之间的变化幅度越强，屋盖在全开状态下的各点风压系数的分布折线变化最大。

图 12 为全开屋盖在不同风速和不同角度下屋盖风压系数的折线示意图。

由图 12 可知：当风向角为 30°和 60°时，各个测点的风压系数值相差最大。这是因为风向与洞口的对角线方向一致，导致内部风压发生较大的变化，由此可以认为在 7.5 m/s 的风速下 30°和 60°风向角是最不利的情况。当风向角为 90°时，E、F 测点的风压系数值普遍偏大，这是因为 E、F 测点所在的边界线是迎风面。此时建筑物尾部产生尾流，对建筑物顶部的后半部分影响较大。并且 E、F 测点又处于固定屋盖后半部分边缘处，风效应对两个测点的影响较大。

图 13 为风速为 15 m/s 时不同开合状态、不同风向角下屋盖风压系数的折线示意图。

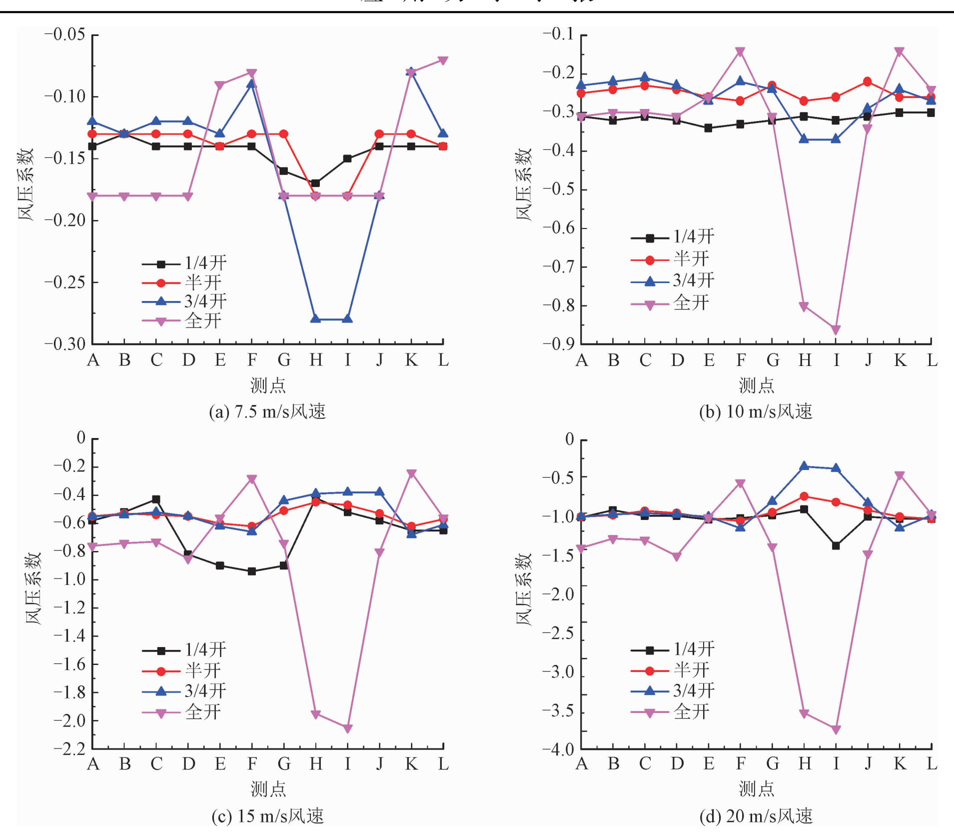


图 11　不同风速不同开合条件下风压系数对比图

Fig. 11　Contrast graph of different wind speed under different retractable condition

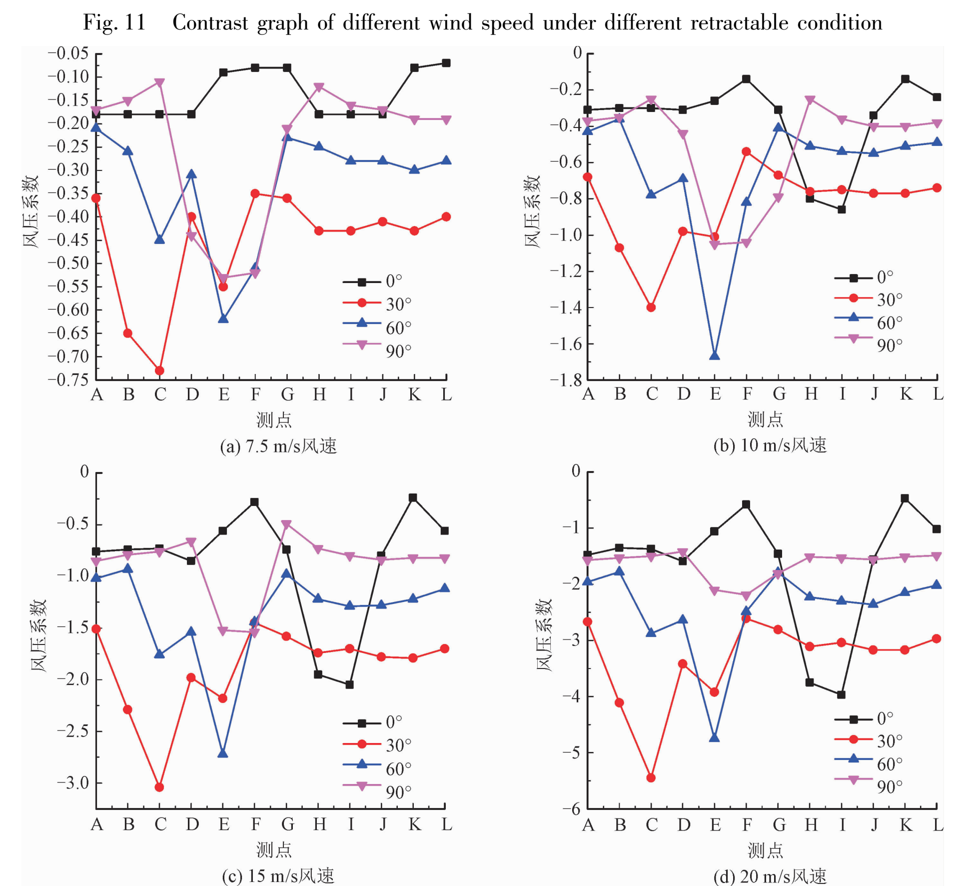


图 12　不同风速和不同角度下全开对比图

Fig. 12　Open contrast figure under different wind speed and different angle

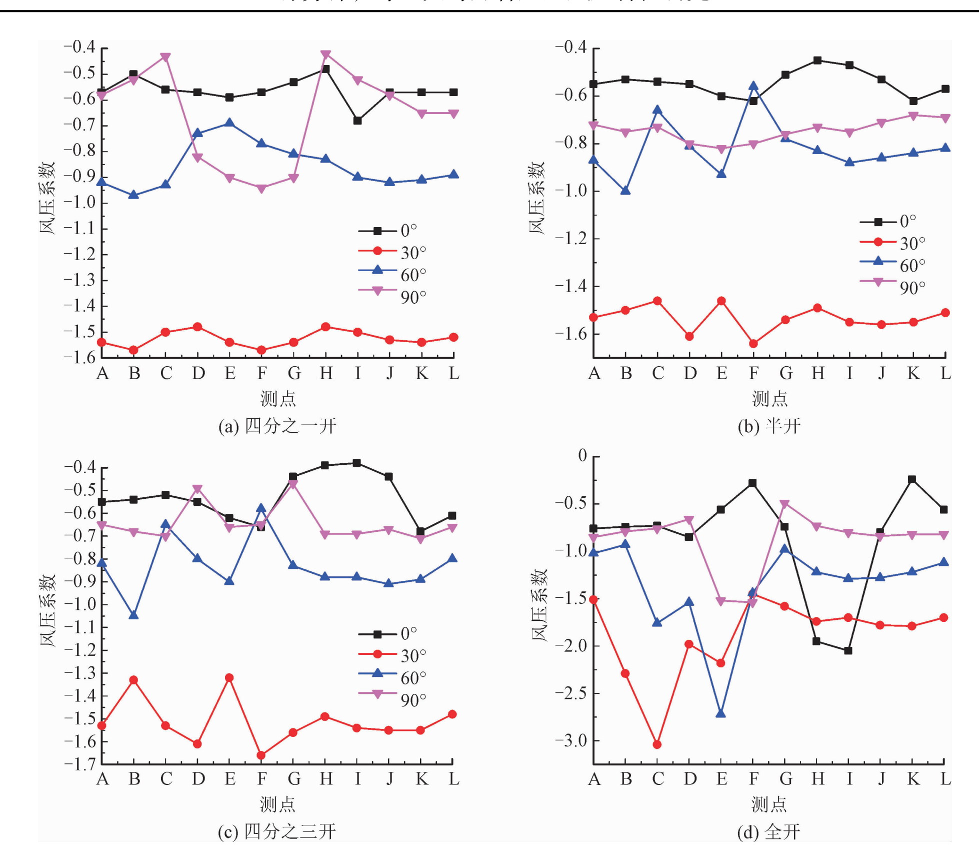


图 13　4 种开合在不同风向角下对比风压系数

Fig. 13　Comparison of wind pressure coefficients at different wind direction angle

由图 13 可知：随着屋盖开洞面积的增加，各个测点的风压系数变化幅度也越来越大，尤其在风向角为 30°时，除全开外这种现象最为明显。4 种开合状态下，风压系数变化幅度最为平稳的是 0°风向角，且总体来看在风速为 15 m/s 时各个测点的风压系数值在 0°风向角下最小，30°风向角时最大，风向角 60°时风压系数值普遍大于 90°。

5　大跨开合屋盖体型系数分布

因为在风压较为敏感的区域，局部的体型系数有可能要比规范中给出的限定值要大。因此通常会先将大跨度结构分区，然后给出其分区的局部体型系数，这样会使得到的数据更为准确且简化计算。

各测点的平均风压计算式为

$$w_i = C_{pi,\mathrm{mean}} w_h \tag{3}$$

式中：w_h 为刚性模型试验中参考点风压相对应实际高度的风压值；$C_{pi,\mathrm{mean}}$ 为根据风洞试验得到的各测点 i 的平均风压系数。

$$w_i = C_{pi,\mathrm{mean}} u_{zh} w_h \tag{4}$$

根据式(3)和式(4)可知，各测点的风载体型系数 u_{si} 为

$$u_{si} = C_{pi,\mathrm{mean}} \frac{u_{zh}}{u_{zi}} = C_{pi,\mathrm{mean}} \frac{(h/10)^{2\alpha}}{(z_i/10)^{2\alpha}} = C_{pi,\mathrm{mean}} \left(\frac{h}{z_1}\right)^{2\alpha} \tag{5}$$

式中：h 为试验时所选择的参考高度；α 为地面粗糙度指数。

根据我国现行规范规定[8]和以上公式可以推导出屋盖的分区体型系数，即

$$u_s = \frac{\sum_{i=1}^{n} u_{si} A_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \tag{6}$$

式中：u_{si} 为测点 i 的体型系数；n 为测点数；A_i 为各测点所代表的面积。

本研究计算了全开模型在风速 7.5 m/s，0°风向角的条件下的分区值，体型系数分区值如图 14 所示。

由图 14 可知：由于风向角为 0°，体型系数值在屋盖中心线处发生突变，11、4、6、14 区的体型系数为正值，10、3、1、7 区体型系数则变成负值。屋盖中心线左面区域体型系数普遍为正值，而中心线右面

区域的值有正有负。分区体型系数值的计算对实际抗风工程有较大的参考价值,但误差同样存在。本次计算得出的结论不受实际尺寸的影响,不同开洞形式的分区体型系数可以根据具体情况依照本次计算方式再次进行模拟。

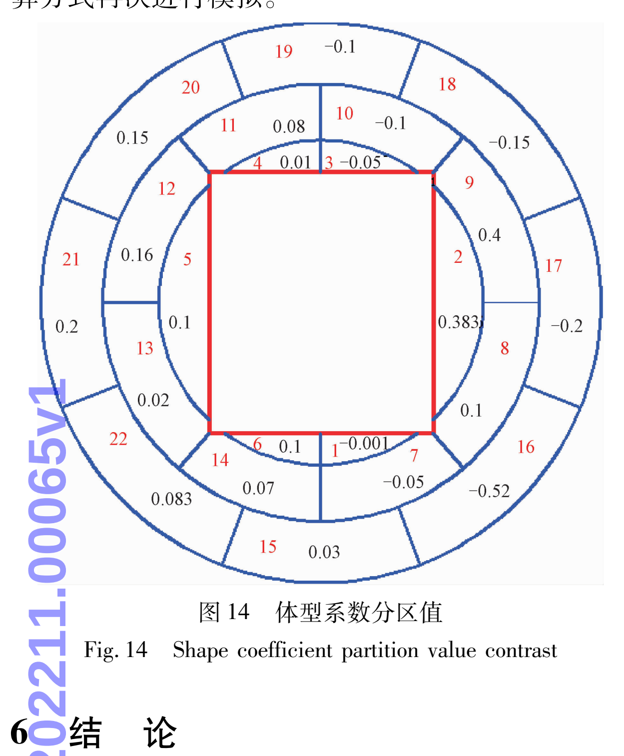


图 14 体型系数分区值

Fig. 14 Shape coefficient partition value contrast

6 结 论

1)当风向角为 0°时,I、H 测点的风压系数值较其他测点大;90°风向角时,E、F 测点的风压系数值较为突出;在全开状态下,C、E、F、I、H 测点的风压系数值较其他测点大。

2)随着屋盖开合状态的改变,固定屋盖的表面风压分布有明显的变化但风压系数平均值较为相似。

3)当风向角为 0°时,体型系数值在屋盖中心线处发生突变,可以看出 11、4、6、14 区的体型系数为正值,10、3、1、7 区体型系数则变成负值。屋盖中心线左面区域体型系数普遍为正值,而中心线右面区域的值有正有负。

参考文献:

[1] 董石麟,邢栋,赵阳. 现代大跨空间结构在中国的应用与发展[J]. 空间结构,2012,18(1):4-5.
DONG Shilin,XING Dong,ZHAO Yang. Application and development of modern long-span spatial structure in China[J]. Spatial structure,2012,18(1):4-5(in Chinese).

[2] 侯建民. 浅析开合屋盖结构的发展与实践[J]. 科技创新与应用,2014,35:249.
HOU Jianmin. Brief analysis of the development and practice of open and closed roof structure[J]. Architectural science,2014,35:249(in Chinese).

[3] 杨以荣,周海洋,薛晨,等. 开合屋盖结构变形与震动特性的模型试验研究[J]. 工业建筑,2015,45(3):135-140.
YANG Yirong,ZHOU Haiyang,XUE Chen,et al. Model test of deformation and vibration characteristics of retractable roof structures[J]. Industrial construction,2015,45(3):135-140(in Chinese).

[4] 周晓飞. 大跨度可开合屋盖结构风洞试验与等效风荷载研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.

[5] ZHANG Jianguo,ZHUANG Huimin. Wind load characteristics of a long-span retractable roof structure[J]. Applied mechanics and materials,2014,525:397-402.

[6] PANNEER S P. Computation of pressures on Texas Tech University building using large eddy simulation[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics,1997,67/68:647-657.

[7] 孙帮成,李明高. ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计[M]. 北京:机械工业出版社,2013.

[8] MURAKAMI S,MOCHIDA A,HIBI K. Three-dimensional numerical simulation of air flow around a cubic model by means of large eddy simulation[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics,1987,25(3):291-305.

(编辑 张璐)